

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO USO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

MARIANE SISDELLI DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO USO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

MARIANE SISDELLI DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D (UnB)
(ORIENTADOR)

RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

IVONNE A. G. GÓNGORA, DSc. (UniCEUB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, DIA 08 de DEZEMBRO de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, MARIANE SISDELLI DE

Avaliação do uso de reforço geossintético em pavimentos flexíveis [Distrito Federal] 2016.

xii, 55 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Geossintéticos

2. Pavimentos

3. Reforço

4. Análise Numérica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, M. S. de (2016). Avaliação do uso de reforço geossintético em pavimentos flexíveis. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 55 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mariane Sisdelli de Oliveira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do uso de reforço geossintético em pavimentos flexíveis

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Mariane Sisdelli de Oliveira
SHIGS 703 Bloco K Casa 67
70331-711 – Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tenho.

Aos meus familiares, pela paciência e por acreditarem na minha capacidade, em especial aos meus pais, Terezinha e Aderico. Sou eternamente grata pelo amor incondicional, dedicação, carinho e confiança. Vocês foram presença constante mesmo frente à tantos quilômetros que nos separam.

Ao meu melhor amigo e irmão, Murillo, por ser meu companheiro fiel e por alegrar meus dias e me dar forças quando eu precisei.

À minha avó Tereza, pela fé.

Aos meus tios, Antônio e Flor, por me darem suporte e me incentivarem desde sempre.

Aos amigos, pelos momentos marcantes em toda essa jornada.

Aos professores da Universidade de Brasília por me transmitirem todo o conhecimento adquirido, em especial ao professor Ennio Marques Palmeira pela orientação neste projeto.

A todos que me ajudaram a conquistar mais esta etapa, este sonho, minha eterna gratidão.

RESUMO

A monografia aqui apresentada trata-se da segunda parte do desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, onde propõe-se uma análise numérica de um trecho rodoviário pavimentado localizado no Distrito Federal, mais precisamente de um trecho em duplicação e outro em construção da BR-020. O estudo dispõe do emprego de geossintéticos aplicados à sistemas de reforço estrutural em pavimentos flexíveis.

Os estudos relativos a tecnologias e associação de novos materiais aos processos de execução convencionais mostram-se especialmente relevantes, visto a busca incessante por melhores técnicas, com resultados mais satisfatórios e que demandem baixa manutenção. Mais que isso, o intento da incorporação de técnicas economicamente viáveis juntamente com práticas sustentáveis e responsabilidade ambiental ainda é visto como paradigma contraditório da construção civil.

Na primeira parte do trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica e descrição geral do projeto a ser estudado. Aqui, discorre-se sobre temas de estruturas de pavimentos rodoviários, geossintéticos e técnicas de reforço aplicadas em pavimentos.

Já na segunda parte deste estudo, realizou-se uma análise numérica com a utilização do *software* PLAXIS 2D para a simulação e avaliação do comportamento do pavimento caso fosse aplicado o uso de geossintético em sua construção.

DSUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA	1
1.2	OBJETIVO	1
2	PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	1
2.1	TIPOS DE PAVIMENTOS	2
2.2	SEÇÃO TRANSVERSAL DO PAVIMENTO	2
2.2.1	SUBLEITO.....	3
2.2.2	LEITO	3
2.2.3	REFORÇO DO SUBLEITO	3
2.2.4	SUB-BASE.....	3
2.2.5	BASE.....	4
2.2.6	REVESTIMENTO	4
2.3	PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	5
2.3.1	FISSURAS OU TRINCAS	5
2.3.2	AFUNDAMENTO	7
3	GEOSSINTÉTICOS.....	9
3.1	GEOTÊXTIL.....	10
3.2	GEOGRELHA	10
3.3	GEOCÉLULA.....	10
3.4	GEORREDE.....	11
3.5	GEOMANTA	11
3.6	GEOMEMBRANA	11
3.7	GEOCOMPOSTO.....	11
4	REFORÇO DO PAVIMENTO	13

4.1	GEOSINTÉTICOS EM SISTEMAS DE REFORÇO.....	13
5	ANÁLISE DE REFORÇO DO PAVIMENTO.....	20
5.2	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MODELAGEM NUMÉRICA	21
6	MATERIAIS E MÉTODOS	22
6.1	CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO	22
6.2	UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE PLAXIS 2D	26
7	RESULTADOS E ANÁLISE	29
8	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Aplicabilidade de geossintéticos em projetos de engenharia (CTG ABINT - modificado)	12
Tabela 6.2: Parâmetros de solo adotados	25
Tabela 6.3: Parâmetros do geossintético adotados	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de seção transversal do pavimento (DNIT, 2006 - modificado)	4
Figura 2.2: Trincas longitudinais (DNIT, 2006)	6
Figura 2.3: Trincas transversais (DNIT, 2006)	6
Figura 2.4: Trincamento tipo bloco (DNIT, 2006).....	7
Figura 2.5: Escorregamento do revestimento (DNIT, 2006)	8
Figura 2.6: Afundamento por consolidação nas trilhas de roda (DNIT, 2006).....	9
Figura 2.7: Afundamento plástico nas trilhas de rodas (DNIT, 2006).....	9
Figura 4.8: Geossintético como agente confinante do solo (PERKINS e ISMEIK, 1997).....	15
Figura 4.9: Aumento da capacidade de suporte do solo (PERKINS e ISMEIK, 1997).....	15
Figura 4.10: Geossintético submetido a tensões de tração (PERKINS e ISMEIK, 1997).....	16
Figura 4.11: Geocélula de polipropileno como confinamento do solo (ACQUA)	18
Figura 4.12: Geocélula de polipropileno aplicada em reforço do subleito nas obras de Urucu (CTG ABINT)	18
Figura 4.13: a) Padrão de trincamento nas vigas sem geogrelha, após 80 mil ciclos de carga; b) Simulação numérica (MONTESTRUQUE, 2002).....	19
Figura 4.14: a) Padrão de trincamento nas vigas com geogrelha, após 500 mil ciclos de carga; b) Simulação numérica (MONTESTRUQUE, 2002)	19
Figura 6.15: Mapa de Localização (DNIT, 2008)	23
Figura 6.16: Condições de contorno para a análise do pavimento: a) Sem camada de geossintético entre a base e o subleito; b) Com camada de geossintético entre a base e o subleito	27
Figura 6.17: Malha média gerada pelo software.	28
Figura 6.18 Conectividades da malha para simulação numérica	29
Figura 7.19: Simulação 1: a) Malha deformada; b) Distribuição de tensões de cisalhamento	30
Figura 7.20: Simulação 2: a) Malha deformada; b) Distribuição de tensões de cisalhamento	30
Figura 7.21: Simulação 3: a) Malha deformada; b) Distribuição de tensões de cisalhamento	31

Figura 7.22: Relação entre o deslocamento prescrito e a tensão vertical no pavimento para a Simulação 1	32
Figura 7.23: Relação entre o deslocamento prescrito e a tensão vertical no pavimento para a Simulação 2	32
Figura 7.24: Relação entre o deslocamento prescrito e a tensão vertical no pavimento para a Simulação 3	33
Figura 7.25: a) Deslocamento vertical; b) Força axial na camada de geossintético para a Simulação 1	36
Figura 7.26: a) Deslocamento vertical; b) Força axial na camada de geossintético para a Simulação 2	37
Figura 7.27: a) Deslocamento vertical; b) Força axial na camada de geossintético para a Simulação 3	38

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials	16
CBR – Índice de Suporte Califórnia	3
CU - Ensaio triaxial consolidado e não drenado.....	21
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem	2
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.....	4
GLP – Gás liquefeito de petróleo	17
TBR - Traffic Benefit Ratio	16

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Coesão
k	Coeficiente de permeabilidade
E	Módulo de elasticidade ou módulo de <i>Young</i>
EA	Rigidez à tração
σ	Tensão normal no plano de ruptura
T_f	Resistência ao cisalhamento
\emptyset	Ângulo de atrito interno do solo.
γ	Peso específico do solo
σ	Tensão axial

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA

Os pavimentos rodoviários são projetados para resistirem a determinadas cargas de tráfego ao longo de um período pré-determinado, também conhecido como período de projeto. Durante este período, o pavimento deteriora-se a partir de uma condição ótima até não mais atender às condições de serventia.

Sucessivamente, os pavimentos estão diariamente sujeitos a fatores externos prejudiciais tanto à estrutura quanto ao desempenho funcional destes. Exemplos de fatores são excessos de carga de tráfego, condições ambientais adversas, desgaste, entre outros.

Por conseguinte, o melhor entendimento acerca dos mecanismos que governam os processos de deterioração dos pavimentos, assim como os tipos de defeitos mais recorrentes, torna-se um fator essencial na escolha e identificação das melhores técnicas e materiais favoráveis para a construção ou restauração da estrutura do pavimento.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como finalidade um estudo de caso de um trecho de rodovia constituída sem e com a utilização de reforços com geossintéticos, a fim de propor aplicações e discutir a viabilidade do uso de geossintéticos em pavimentos flexíveis. Faz-se, de tal modo, uma análise de caráter de projeto a ser discutida neste estudo.

2 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

Entende-se por pavimento rodoviário, segundo o DNER, toda estrutura especificada a resistir aos esforços horizontais e verticais provocados pelo fluxo dinâmico de veículos e melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança dos usuários.

O DNER ainda classifica os pavimentos em três categorias, sendo estas:

- Pavimento flexível: toda a parcela de carga proveniente do carregamento aplicado é distribuída em parcelas aproximadamente análogas ao longo das camadas constituintes e todas as camadas sofrem deformação elástica expressiva.
- Pavimento semirrígido: é constituído por uma base cimentada por material coalescente com propriedades cimentícias.
- Pavimento rígido: absorve majoritariamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado devido à sua elevada rigidez comparada às camadas inferiores que o constituem.

Neste estudo em particular, serão tratados prioritariamente aspectos relacionados à pavimentos flexíveis.

2.2 SEÇÃO TRANSVERSAL DO PAVIMENTO

Qualquer pavimento, seja este rígido ou flexível, é constituído por uma série de camadas, podendo esta ter ou não função estrutural dentro do conjunto denominado pavimento. Assim, uma seção típica de pavimentos será composta pelos componentes descritos a seguir.

2.2.1 SUBLEITO

Denomina-se por subleito o terreno de fundação onde toda a estrutura do pavimento será suportada. O subleito tem a função de suportar os esforços transmitidos pelo pavimento dentro dos limites admitidos pelo mesmo (DNIT, 2006).

2.2.2 LEITO

O leito é a superfície obtida após a terraplenagem com características geométricas compatíveis com o greide e seção transversal da rodovia. A depender das condições do leito, torna-se ou não necessária a regularização do subleito, também denominada como nivelamento, que compreende cortes ou aterros destinados a conformar o leito em caráter transversal e longitudinal (DNIT, 2006).

2.2.3 REFORÇO DO SUBLEITO

O reforço do subleito tem por finalidade aumentar a resistência do subleito com base na capacidade de suporte deste, obtida pelo CBR. É normalmente obtido por tratamentos aplicados à superfície de modo a apresentar características de suporte superiores à camada anterior. A utilização desta camada de reforço está comumente associada à subleitos de baixa qualidade ou à tráfegos intensos (DNIT, 2006).

2.2.4 SUB-BASE

Camada complementar à base, a sub-base tem por finalidade resistir aos esforços verticais resultantes das cargas de tráfego. Apresenta características inferiores às da camada de base, porém superiores às do leito ou reforço do subleito, quando aplicável. É tida como camada estrutural, devendo possuir capacidade de suporte e estabilidade, além de adequadas condições de drenagem. Além da função estrutural, a sub-base também atua na prevenção da passagem de solo do subleito na base. Também pode ser aplicável por circunstâncias econômicas, onde a execução da camada de base diretamente sobre o leito não se mostra viável (DNIT, 2006).

2.2.5 BASE

Possui mesma função estrutural que a sub-base e pode estar situada diretamente sobre o subleito ou acima da sub-base. É composta comumente de materiais oriundos de britagem, misturas de solos ou materiais mistos derivados da mistura de solos com materiais britados. A base também pode ter materiais tratados ou estabilizados, a depender da necessidade (DNIT, 2006).

2.2.6 REVESTIMENTO

É a camada mais externa do pavimento, que recebe diretamente a ação das cargas aplicadas, constituída por ligante betuminoso e agregado. O revestimento tem por finalidade resistir aos esforços de tração nele atuantes, ser resistente ao desgaste, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e promover uma superfície impermeável. É a camada mais nobre de todo o conjunto constituinte do pavimento, onde o tipo de revestimento é dependente de circunstâncias técnico-econômicas (DNIT, 2006).

O Manual de Pavimentação do DNIT apresenta a Figura 2.1 que ilustra as camadas constituintes do pavimento.

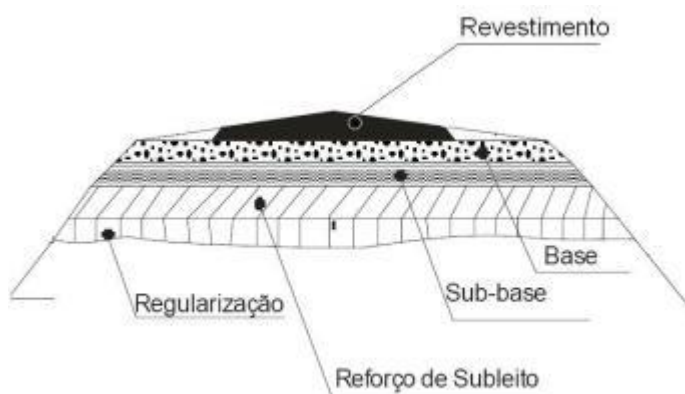


Figura 2.1: Esquema de seção transversal do pavimento (DNIT, 2006 - modificado)

2.3 PRINCIPAIS PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Patologias em pavimentos flexíveis, ou também conhecida como defeitos, são falhas comumente ocasionadas por falhas de execução ou de suporte, podendo comprometer o pavimento integralmente ou em zonas isoladas.

Tais defeitos podem ser classificados como defeitos estruturais ou funcionais. O primeiro relaciona-se fundamentalmente à capacidade de desempenho e suporte do pavimento, já o segundo diz respeito às condições de rolamento da via, assim como conforto e segurança do usuário.

Abaixo serão listadas as principais patologias em pavimento flexível correlacionadas com fatores com características das camadas constituintes do pavimento, excluindo-se aquelas associadas apenas ou primordialmente as características do ligante asfáltico.

2.3.1 FISSURAS OU TRINCAS

Também denominadas como fendas, (DNIT, 2006) classifica fissuras ou trincas como qualquer descontinuidade do pavimento. São normalmente causadas pela atuação do conjunto de tráfego cíclico que promova tensões de tração na fibra interior do revestimento, ocasionadas por baixa capacidade de suporte do subleito, subdimensionamento da base ou mesmo excesso de carga no pavimento. Outro fator fortemente influente é a ocorrência de contrações no revestimento resultantes da variação de temperatura.

As fendas também podem ser originárias da reflexão no revestimento novo de fissuras e trincas pré-existentes no revestimento antigo ou pelo não atendimento das especificações da massa asfáltica utilizada.

As Figuras 2.2, 2.3 e 2.4 exemplificam os tipos de fendas que podem ocorrer na superfície de pavimentos flexíveis de acordo.

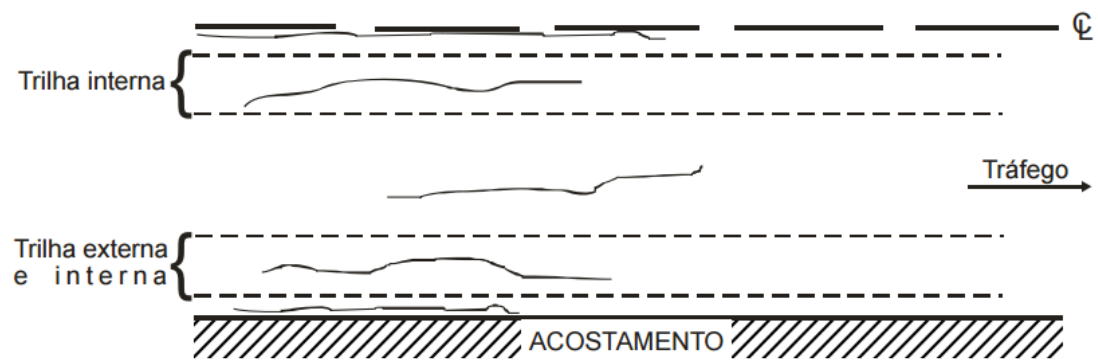


Figura 2.2: Trincas longitudinais (DNIT, 2006)

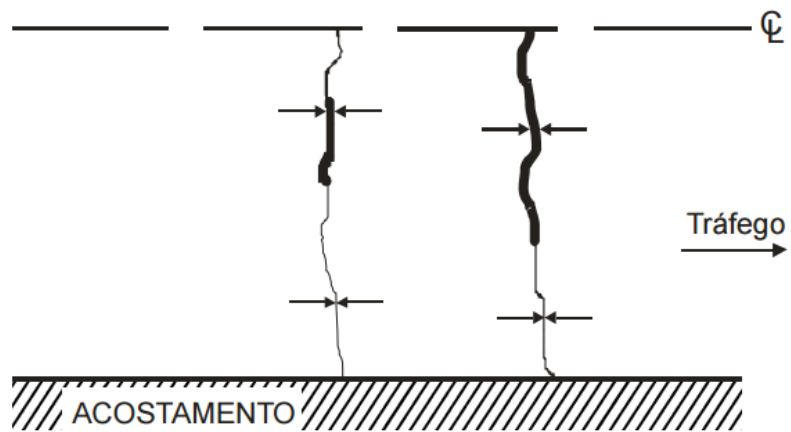


Figura 2.3: Trincas transversais (DNIT, 2006)

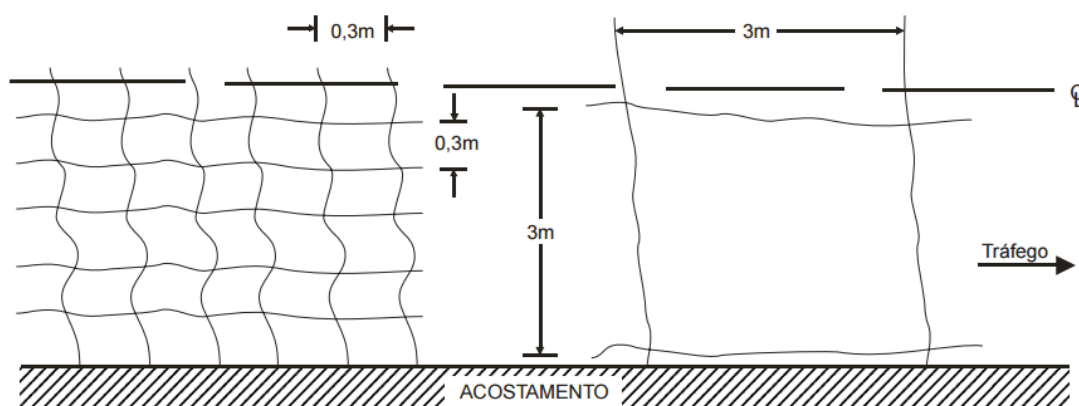


Figura 2.4: Trincamento tipo bloco (DNIT, 2006)

2.3.2 AFUNDAMENTO

O termo afundamento, por definição, designa uma deformação permanente do pavimento e é normalmente caracterizada por depressão desenvolvida na camada superficial, segundo (DNIT, 2006). Desta forma, o afundamento pode apresentar-se de duas formas distintas, sendo estas afundamento plástico e afundamento de consolidação.

O afundamento plástico, ou deformação plástica do revestimento, é o deslocamento horizontal de uma ou mais camadas constituintes do pavimento. Este tipo de deformação normalmente ocorre na direção do tráfego, nas regiões de aceleração e frenagem em decorrência de grandes tensões horizontais.

Um dos defeitos causados pelo afundamento plástico são aqueles conhecidos por ondulação ou corrugação, que se caracterizam por ondulações transversais permanentes no revestimento. Segundo o (DNIT, 2006), este tipo de ruptura ocorre por cisalhamento decorrente da carga de tráfego aplicada, quando no revestimento ou entre o revestimento e a base do pavimento.

Podem ocorrer também falhas caracterizadas por escorregamento do revestimento, resultante aos efeitos tangenciais transmitidos ao pavimento, como descritas pelo DNIT. São usualmente em formato de meia lua, com presença de trincas parabólicas. Se agravado, este

tipo de deformação pode gerar exposição das camadas inferiores do pavimento, anteriormente protegidas pelo revestimento.

A Figura 2.5 mostra uma ilustração do escorregamento:

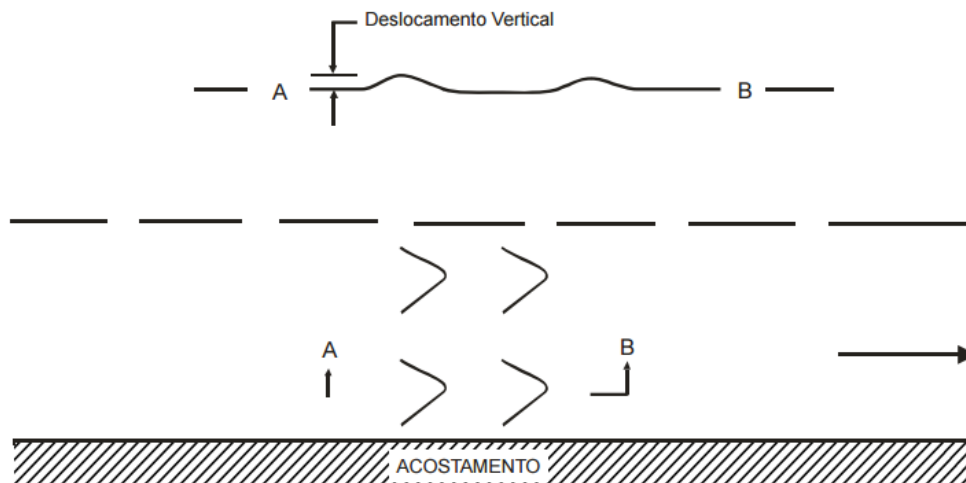


Figura 2.5: Escorregamento do revestimento (DNIT, 2006)

Já o afundamento de consolidação ocorre em decorrência da consolidação diferencial das camadas do pavimento, porém sem compensação volumétrica lateral. Segundo (BERNUCCI, *et al.*, 2006), o afundamento por consolidação, seja este localizado ou em trilha de roda, é decorrente de densificação ou ruptura por cisalhamento. Quando localizado, pode também ocorrer devido a deficiências construtivas, como subdimensionamento das camadas, por exemplo. A progressão deste tipo de patologia pode gerar o aparecimento de fissuras e trincas, enfraquecendo o pavimento.

As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram os dois tipos de afundamento que o pavimento pode ser submetido.

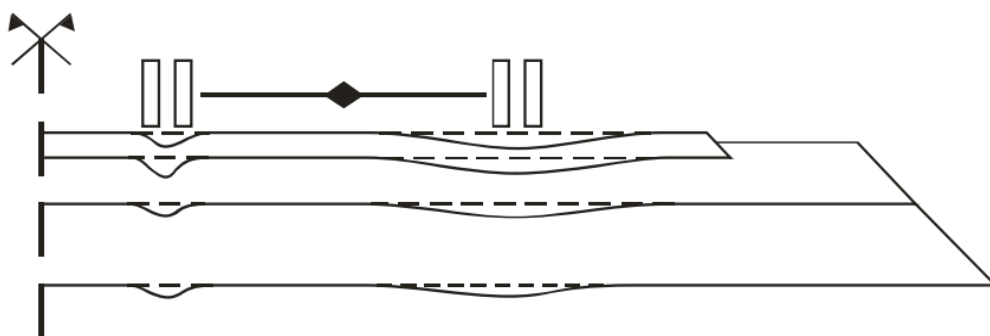


Figura 2.6: Afundamento por consolidação nas trilhas de roda (DNIT, 2006)

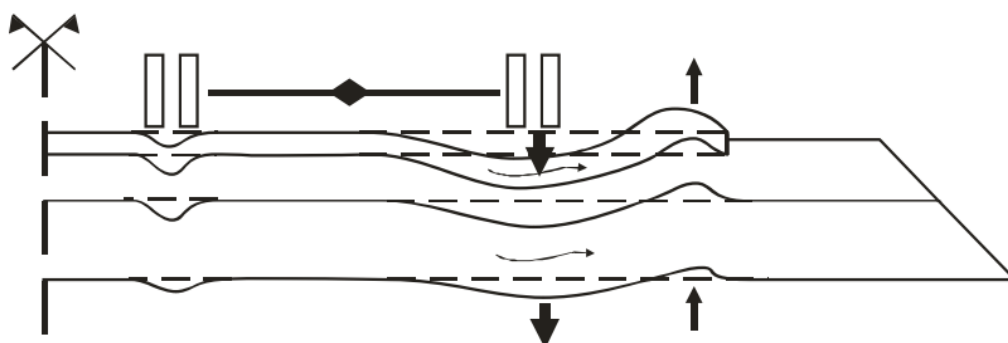


Figura 2.7: Afundamento plástico nas trilhas de rodas (DNIT, 2006)

3 GEOSINTÉTICOS

Geossintéticos são produtos industrializados que apresentam em sua composição pelo menos um composto polimérico sintético ou natural, com aplicação nas mais diversas obras geotécnicas com funções de reforço, filtração, drenagem, impermeabilização, controle de erosão, entre outros (IGS). São classificados em categorias, de maneira geral, dependentes do processo de fabricação para sua obtenção.

3.1 GEOTÊXTIL

Geotêxteis são materiais de formação têxtil a base de polímeros naturais ou sintéticos, planos e permeáveis. São normalmente utilizados diretamente em contato com o solo ou sobre outros materiais (ABNT NBR ISO 10318:2013).

A (ABNT NBR ISO 10318:2013) classifica geotêxteis como mantas tecido, não-tecido ou tricotado. Geotêxteis não tecido são aqueles produzidos a partir de fibras ou filamentos conectados por processos mecânicos, térmicos ou químicos e dispostos de forma aleatória. Já geotêxteis tecidos são aqueles produzidos a partir de fios, filamentos ou outros elementos entrelaçados normalmente em malhas quadriculadas. Por fim, geotêxteis tricotados são aqueles compostos por filamentos entrelaçados (ABNT NBR ISO 10318:2013).

3.2 GEOGRELHA

Geogrelhas são definidas como estruturas poliméricas, planas, conectadas por processos mecânicos, térmicos ou químicos e dispostas de forma ordenada. São caracterizadas por sua alta resistência a tração e por possuírem formato de malha regular com aberturas maiores do que seus constituintes (ABNT NBR ISO 10318:2013).

3.3 GEOCÉLULA

Geocélulas são estruturas poliméricas, tridimensionais e permeáveis. Possuem normalmente o formato de casa de abelha ou similar e são obtidas através da união de tiras geossintéticas (ABNT NBR ISO 10318:2013).

3.4 GEORREDE

Georredes são constituídas por vários conjuntos de elementos geossintéticos interligados e superpostos entre si em angulação variada. Podem também conter outros elementos similares. (ABNT NBR ISO 10318:2013).

3.5 GEOMANTA

Geomantas são definidas como estruturas poliméricas, tridimensional, conectados por processos mecânicos, térmicos ou químicos e dispostos de forma ordenada. São normalmente constituídas de monofilamentos poliméricos, porém podem também ser obtidas a partir de outros elementos similares, sintéticos ou naturais. (ABNT NBR ISO 10318:2013).

3.6 GEOMEMBRANA

Geomembranas, ou também chamadas de barreiras geossintéticas, são materiais de baixa ou baixíssima permeabilidade, utilizados em obras com intenção de limitar ou impedir a percolação de fluidos (ABNT NBR ISO 10318:2013).

Podem ser do tipo geossintética polimérica, argilosa ou betuminosa. Ambas são produzidas em formato lamelar e atuam como uma barreira física no sistema (ABNT NBR ISO 10318:2013).

3.7 GEOCOMPOSTO

A norma (ABNT NBR ISO 10318:2013) define geocompostos como material industrializado resultante da superposição ou associação de materiais geossintéticos ou similares.

A Tabela 3.1 demonstra de forma sucinta a aplicabilidade de algumas categorias de geossintéticos tratadas acima:

Tabela 3.1: Aplicabilidade de geossintéticos em projetos de engenharia (CTG ABINT - modificado)

Geossintéticos	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geotêxteis	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Geogrelha	Sim	-	-	-	-	Sim	-
Geomembrana	Sim	-	-	-	-	-	Sim
Georrede	-	Sim	-	Sim	-	-	-
Geocomposto	-	-	-	-	-	-	Sim
Geocélula	-	Sim	-	-	Sim	Sim	-

4 REFORÇO DO PAVIMENTO

Dentre as principais patologias detalhadas no capítulo anterior, excesso de cargas, erros de execução ou uso e dimensionamento de materiais inadequados enquadram-se entre os principais causadores de defeitos em pavimentos, sejam estes flexíveis ou não. Entretanto, pouco se percebe acerca de alternativas de reestruturação de pavimentos e aplicação de novos materiais e tecnologias na construção dos mesmos.

Um erro bastante comum é a utilização de soluções paliativas. Restaurações parciais só se tornam viáveis quando os defeitos são apresentados pontualmente e estendem-se apenas às camadas superficiais do pavimento. Caso contrário, se aplicadas em situações com defeitos globais, os trechos vizinhos ao trecho recuperado continuarão apresentando as mesmas patologias, e em provável estado de evolução e degradação.

Neste capítulo, serão tratados aspectos direcionados aos materiais e técnicas de reforço de pavimentos flexíveis, correlacionando de maneira mais sucinta com possíveis aplicabilidades de tais materiais em práticas de reabilitação de pavimentos.

4.1 GEOSSINTÉTICOS EM SISTEMAS DE REFORÇO

Ainda que o emprego de estruturas tensionadas em pavimentos seja objeto de estudo a algumas décadas, o uso e aplicação de geossintéticos nesta área ainda se mostra restrito em algumas regiões do Brasil.

Estudos mostram que geossintéticos podem ser satisfatoriamente empregados em sistemas de reforço não somente entre camadas as camadas constituintes da estrutura do pavimento, mas também em camadas de revestimento asfáltico, favorecendo as propriedades mecânicas do pavimento contra falhas devido a fadiga ou reflexão de trincas. Ademais, o emprego de geossintéticos pode ser considerada como um dos mais efetivos em técnicas de reforço e reabilitação de pavimentos (PASQUINI et al., 2014)

Visto a grande variedade de geossintéticos disponíveis, a combinação de membranas betuminosas e grelhas reforçadas, com finalidade de combinar a propriedade tênsil das grelhas com a absorção de impactos e o caráter impermeável da membrana betuminosa, mostra-se como uma opção favorável ao sistema de reforço do pavimento (PASQUINI et al., 2014).

Segundo estudos feitos pelo Centro de Pesquisas de Pavimentos Rodoviários da Bélgica com ensaios que simulam os movimentos do substrato, o elemento primordial na absorção das tensões geradas no sistema consiste na aderência entre a grelha de reforço e o betume da camada superior. Para tanto, o módulo de rigidez à tração do material associado e as aberturas da malha são fatores a serem avaliados.

Entretanto, segundo PASQUINI et al., (2014) o uso e aplicação de estruturas de reforço na interface das camadas que compõem o pavimento certamente implica na redução do contato entre os materiais das camadas subsequentes, influenciando na resposta do pavimento quanto à distribuição de tensões e deformações.

Segundo PERKINS e ISMEIK, (1997) estudos envolvendo geossintéticos em sistemas de reforço de pavimentos flexíveis identificaram três aplicabilidades do uso de reforço com geossintéticos em potencial, tais como uso por confinamento do solo, aumento da capacidade de suporte do solo e aplicações em estruturas submetidas a tração.

Situações de confinamento lateral são normalmente causadas pelo atrito e intertravamento entre a camada de base e a camada de geossintéticos, segundo PERKINS e ISMEIK, (1997). Segundo este, cargas repetitivas causam o efeito de espalhamento lateral na camada de base, o que pode ser reduzido se a camada de geossintéticos estiver propriamente posicionada nos locais de maiores tensões laterais.

Ainda, PERKINS e ISMEIK, (1997) concluíram que a interação entre os agregados da camada de base com a camada de geossintéticos possibilita a transição das tensões de cisalhamento da base para tensões de tração no geossintético. Desta forma, quando submetido à tração, a camada de geossintético limita a propagação de tensões na camada de base.

Consequentemente, o confinamento causado pela camada de geossintéticos submetido a tração aumenta a tensão média da camada inferior, resultando numa maior rigidez e resistência ao cisalhamento da camada de base (PERKINS e ISMEIK, 1997).

Com relação ao aumento da capacidade de suporte do solo, segundo PERKINS e ISMEIK, (1997) a camada de geossintético submete a camada inferior a desenvolver uma superfície de ruptura alternativa àquela em potencial, porém com maior resistência. Desta forma, a ruptura mostra-se inferior.

Por fim, a camada de geossintético passa a ser submetida a tensões de tração como resultado da concavidade causada pelas deformações horizontais. Desta forma, a tensão desenvolvida no material passa a resistir às cargas na qual o pavimento está submetido e reduz a tensão vertical nas camadas inferiores (PERKINS e ISMEIK, 1997).

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 exemplificam as funções descritas.

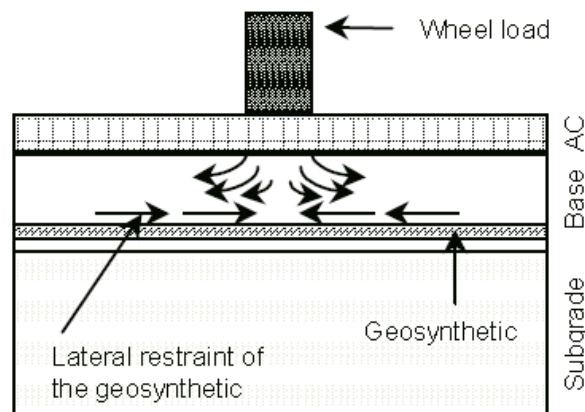


Figura 4.8: Geossintético como agente confinante do solo (PERKINS e ISMEIK, 1997)

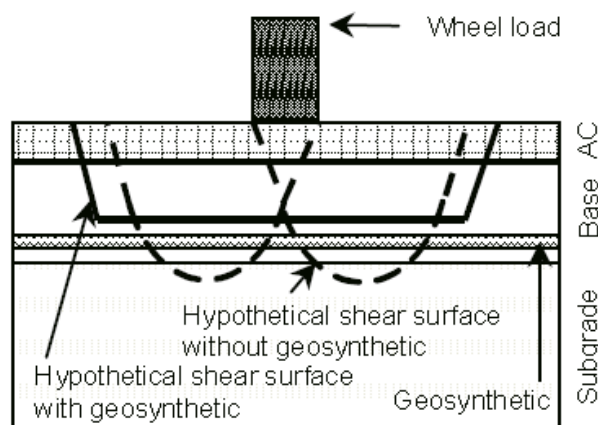


Figura 4.9: Aumento da capacidade de suporte do solo (PERKINS e ISMEIK, 1997)

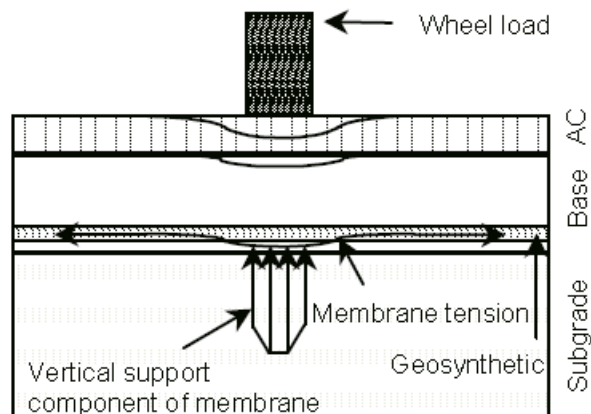


Figura 4.10: Geossintético submetido a tensões de tração (PERKINS e ISMEIK, 1997)

Diversos pesquisadores conduziram ainda estudos acerca das características técnicas de geossintéticos em geral, como tipo, rigidez à tração, local de aplicação, entre outros. AL-QADI *et al.* identificaram uma predominante função dos geotêxteis como agente separador, o que se mostrou mais significativo do que a função de reforço observada em geogrelhas.

Desta forma, segundo os pesquisadores, as seções reforçadas com geotêxteis apresentaram melhores resultados em prevenir a formação de afundamentos do que as seções reforçadas com geogrelhas. Segundo AL-QADI *et al.*, as estruturas reforçadas com geotêxteis resistiram de duas a três vezes mais o número de ciclos de carga do que uma estrutura padrão.

Entretanto, segundo COLLIN, KINNEY e FU, (1996) reforços com geogrelhas provocam um decréscimo de deformações iniciais que normalmente ocorrem durante as primeiras centenas de cargas antes do enrijecimento do pavimento.

Em suma, de acordo com os estudos realizados pelos pesquisadores descritos acima, e utilizando a metodologia de dimensionamento AASHTO adaptada para pavimentos com reforço, tais melhorias foram expressas em termos de “*Traffic Benefit Ratio*” (TBR).

O índice TBR pode ser entendido como a razão entre o número de ciclos necessários para atingir um determinado deslocamento vertical para uma seção reforçada e o número de ciclos necessários para alcançar esta mesma profundidade de sulcos para uma seção não

reforçada com mesmas características quanto à espessura e propriedades do subleito. Desta forma, os estudos acima mencionados indicam melhoras na vida útil da estrutura do pavimento em até 10 vezes, quando comparado a estruturas convencionais.

Ainda segundo PERKINS e ISMEIK, (1997) a aplicação de estruturas de reforço na camada de base tem se mostrado adequada para pavimentos flexíveis onde significantes deformações superficiais não podem ser admitidas. O reforço também favorece casos em que a redução da camada de base se mostra vantajosa ou necessária, visto que o uso de geossintéticos possibilita índices de redução de espessura que podem chegar a mais de 50% a depender das características do solo.

Em Urucu, na região Amazônica, local onde a Petrobrás vem desenvolvendo um de seus terminais de produção de petróleo e GLP, foram necessárias a construção de vias de acesso para permitir a passagem de máquinas para a construção de novos poços de extração de gás e óleo (PETROBRÁS, 2016). Entretanto, o solo da região possui baixa capacidade de carga, além de contar com precipitações diárias que dificultam a execução por processos convencionais. Para isso, utilizou-se de um sistema de confinamento do material granular do subleito com aplicação de geocélulas de polipropileno, aumentando assim a capacidade de carga do solo (CTG ABINT).

A técnica empregada parte do princípio das tensões tangenciais resistivas geradas entre as paredes das geocélulas e o solo como material de preenchimento. As Figura 4.11 mostra um exemplo de geocélula de polipropileno e a Figura 4.12 mostra uma etapa de execução em campo.



Figura 4.11: Geocélula de polipropileno como confinamento do solo (ACQUA)



Figura 4.12: Geocélula de polipropileno aplicada em reforço do subleito nas obras de Urucu (CTG ABINT)

Além disso, em casos de trincamento, as extremidades das trincas apresentam grande concentração de tensões de tração. Desta forma, o emprego de geogrelhas sobre a extremidade da trinca favoreceria a absorção das tensões de tração pelo material, minimizando o potencial de propagação e reflexão de trincas.

As Figuras 4.13 e 4.14 (MONTESTRUQUE, 2002) mostram os resultados de ensaios dinâmicos de fadiga desenvolvidos em laboratório e simulações numéricas realizados pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em vigas de concreto.

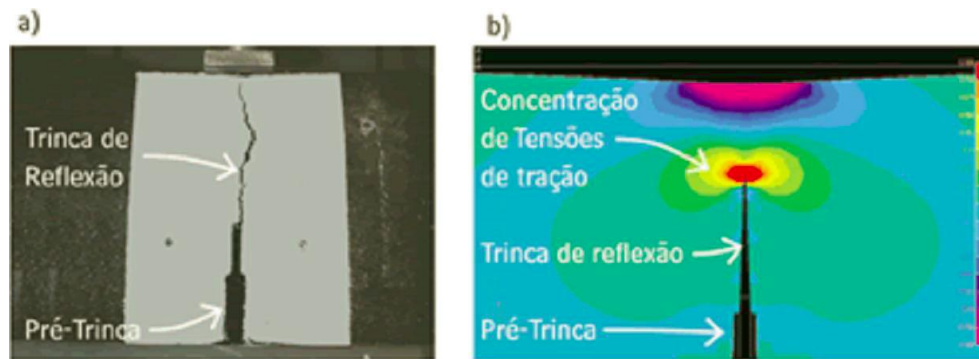


Figura 4.13: a) Padrão de trincamento nas vigas sem geogrelha, após 80 mil ciclos de carga; b) Simulação numérica (MONTESTRUQUE, 2002)

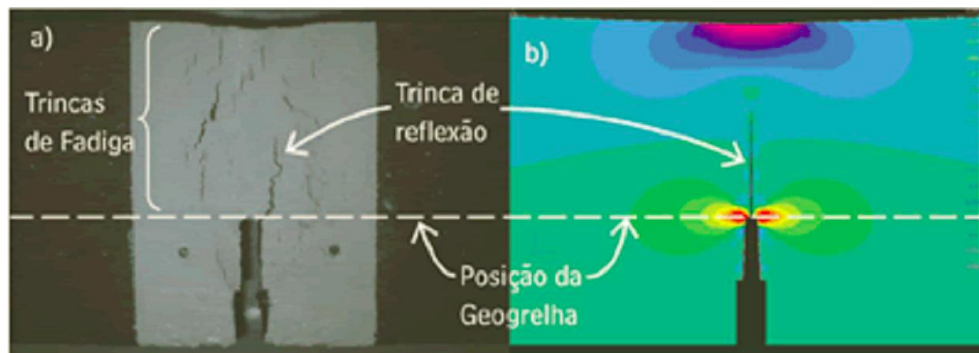


Figura 4.14: a) Padrão de trincamento nas vigas com geogrelha, após 500 mil ciclos de carga; b) Simulação numérica (MONTESTRUQUE, 2002)

Observa-se que, nas vigas reforçadas com geogrelha, a propagação vertical das trincas foi descontinuada e um novo padrão de microfissuras foi observado, porém de forma aleatória e associadas à fadiga da massa asfáltica (MONTESTRUQUE, 2002). As Figuras 4.13 e 4.14 (b) mostram as distribuições de tensões ao longo da peça, destacando-se em vermelho as regiões de maiores tensões, aproximadas à extremidade das trincas.

5 ANÁLISE DE REFORÇO DO PAVIMENTO

A análise de uso de geossintético para reforço do pavimento é feita com o uso do *software* PLAXIS 2D V8. Considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, os parâmetros coesão não drenada, ângulo de atrito não drenado e peso específico saturado são necessários para a determinação da estrutura do pavimento. Esses e outros parâmetros são obtidos por meio de ensaios em laboratório ou em campo, que serão explicados a seguir.

5.1 CRITÉRIO DE RUPTURA MOHR-COULOMB

Segundo a teoria de Mohr (1990), um material se rompe por consequência da combinação de tensão normal e de cisalhamento, e não somente das tensões normais ou de cisalhamento isoladas (DAS, 2007). Tal teoria expressa uma envoltória de ruptura composta por uma linha curva definida pela expressão:

$$T_f = f(\sigma) \quad \text{Equação 1}$$

onde: σ = Tensão normal no plano de ruptura

T_f = Resistência ao cisalhamento

Segundo Coulomb (1776), a aproximação da tensão de cisalhamento no plano de ruptura para uma função linear da tensão normal mostra-se suficiente para grande parte dos problemas envolvendo a mecânica dos solos (DAS, 2007). Assim, esta função linear pode ser descrita como:

$$T_f = c + \sigma \operatorname{tg} \emptyset \quad \text{Equação 2}$$

sendo: c = Coesão

\emptyset = Ângulo de atrito interno do solo.

Para a modelagem numérica feita a partir o *software* PLAXIS 2D V8, adotou-se tal critério de ruptura acima descrito.

5.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica utilizando o *software* PLAXIS 2D V8 necessita de alguns parâmetros característicos do solo, estes obtidos por meio de ensaios de permeabilidade e de compressão triaxial consolidado não drenado.

5.2.1 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

A permeabilidade é uma medida da maior ou menor dificuldade que a água encontra para fluir através do solo. O valor numérico do grau de permeabilidade do solo é expresso pelo coeficiente de permeabilidade (k) (DAS, 2007).

Tal coeficiente k pode ser mensurado através de ensaio de laboratório com carga constante ou variável. A norma NBR 13292/95 prescreve os métodos para determinar o coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante e percolação de água através do meio poroso em regime de escoamento laminar. Já para solos argilosos, devem-se realizar os ensaios de acordo com a NBR 14545, nesse caso, com a carga variável.

5.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CONSOLIDADO NÃO DRENADO (CU - CONSOLIDATED UNDRAINED OU R)

O ensaio de compressão triaxial é utilizado para determinar as características de resistência do solo. Neste ensaio, aplica-se um estado hidrostático de tensões e um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo, onde a pressão confinante atua em todas as direções. Em diferentes intervalos de tempo, o acréscimo de tensão axial e a deformação vertical do corpo de prova são medidos (DAS, 2007).

As tensões desviadoras durante o carregamento axial permitem o traçado dos círculos de Mohr correspondentes ao solo em estudo. Já o círculo de Mohr correspondente à situação de

ruptura é obtido através da tensão desviadora representada em função da deformação específica (DAS, 2007).

No ensaio CU, a pressão confinante é aplicada e a pressão neutra correspondente é dissipada. Assim, o corpo de prova será adensado sob pressão confinante e o carregamento axial é aplicado sem drenagem (DAS, 2007). Através deste ensaio, são obtidos parâmetros de coesão, ângulo de atrito interno, ângulo de dilatância e módulo de elasticidade do solo, dados estes essenciais para a modelagem numérica.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO

Como o objetivo deste trabalho é a comparação entre as análises tensões e deformações da estrutura do pavimento devido ao carregamento cíclico provocado pela rodagem de automóveis, foram analisadas três diferentes configurações de camadas. Todas as modelagens do pavimento possuem mesma geometria, sendo esta correspondente à 10 m de altura relativa ao subleito, 0,39 m de altura relativa à camada de base e largura de 5 m.

As características do pavimento foram obtidas a partir do Relatório de Revisão de Projeto em Fase de Obras do DNIT (2008). A localização da rodovia tomada como parâmetro é mostrada nas Figuras 6.15 abaixo:



Figura 6.15: Mapa de localização (DNIT, 2008)

As seções transversais dos dois pavimentos são mostradas nas Figuras 6.16 e 6.17:

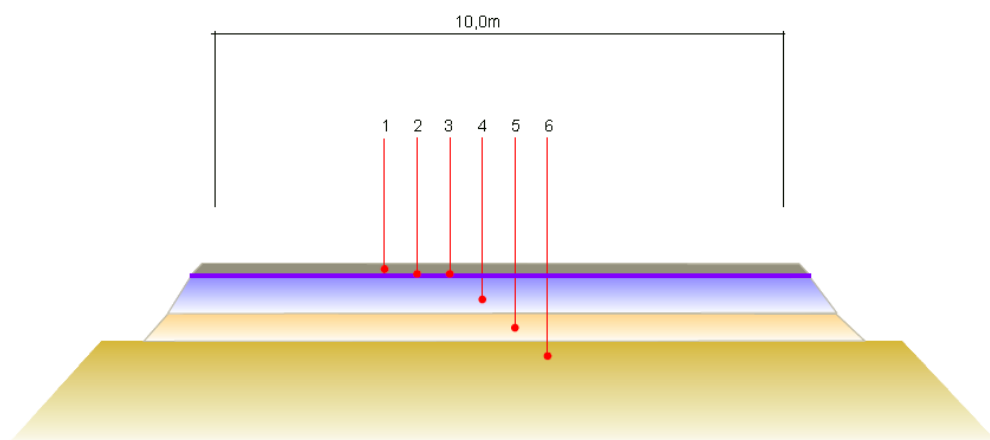


Figura 6.16: Seção transversal do pavimento - vias marginais BR-020/DF (DNIT, 2008)

Onde:

- 1- CBUQ – faixa “C” – $e = 4,0$ cm
- 2- Pintura de ligação
- 3- Imprimação
- 4- Base de solo + 2,0% de cimento – $e = 15,0$ cm

- 5- Sub-base de material granular de jazida – $e = 15,0$ cm
- 6- Regularização do subleito

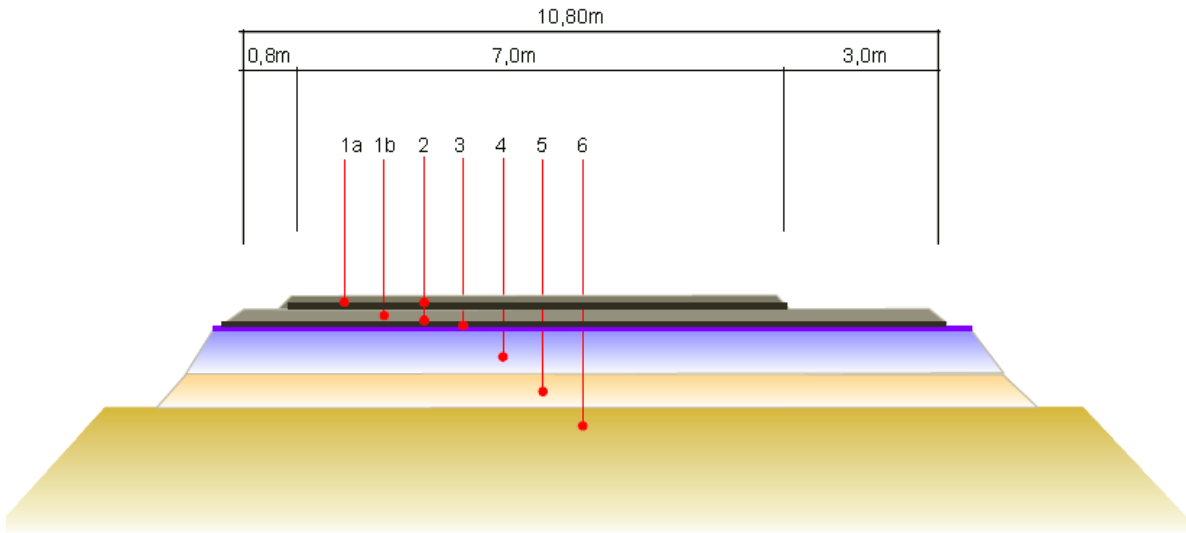


Figura 17: Seção transversal do pavimento projetado original - Duplicação da rodovia BR-020/DF (DNIT, 2008)

Onde:

- 1a- CBUQ – faixa “C” – $e = 4,0$ cm
- 1b- CBUQ – faixa “B” – $e = 5,0$ cm
- 2- Pintura de ligação
- 3- Imprimação
- 4- Base de solo + 2,0% de cimento – $e = 15,0$ cm
- 5- Sub-base de material granular de jazida – $e = 15,0$ cm
- 6- Regularização do subleito

Os parâmetros característicos dos materiais em estudo foram estimados tendo a atenção para que estes fossem coerentes com o problema em análise, conforme as características especificadas no Relatório de Revisão de Projeto em Fase de Obras do DNIT (2008), referentes ao trecho em duplicação da BR-020 e trecho das vias marginais.

Os materiais especificados que compõem os dois trechos acima citados são análogos, diferindo apenas nas características e espessuras da camada de revestimento do pavimento, parcela esta que foi desconsiderada por não se tratar da abordagem deste estudo.

Sabendo que o material da base corresponde a um solo enriquecido com uma taxa de 2,0% de cimento e sub-base composta por material granular de jazida (DNIT, 2008), adotou-se os seguintes parâmetros para as camadas:

Tabela 6.2: Parâmetros de solo adotados

	Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3	
	Base	Subleito	Base	Subleito	Base	Subleito
Módulo de Elasticidade (KPa)	25.000	10.000	50.000	10.000	120.000	60.000
Permeabilidade (m/dia)	3,5	0,9	35	0,9	3,5	0,9
Peso específico seco (kN/m³)	18	16	18	16	18	16
Peso específico saturado (kN/m³)	21	19	21	19	21	19
Ângulo de atrito (°)	30	30	30	30	30	30
Dilatância (°)	12	5	12	5	12	5
Coesão (kN/m²)	50	20	50	20	50	20

Tabela 6.3: Parâmetros do geossintético adotados

	Geossintético 1	Geossintético 2	Geossintético 3
Rigidez à tração (kN/m)	500	1500	4000

6.2 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE PLAXIS 2D

De acordo com HUA (2000), a simulação numérica de reforço de um pavimento flexível pode ser modelada utilizando modelos de elementos finitos bidimensionais ao invés de modelos tridimensionais sem perda significativa de precisão.

Com as seções típicas e os materiais definidos, a estrutura foi modelada no programa de elementos finitos *PLAXIS 2D V8*. Para a simulação, adotou-se o modelo axissimétrico com elementos de 15 nós, com precisão da malha de 0,01 m. A malha foi definida por distribuição média. Assumiu-se ligação total entre as diferentes camadas do pavimento e entre a camada de reforço e camada de base e subleito.

Primeiramente, foram inseridos os parâmetros dos materiais. O solo, presente tanto nas camadas de base como de subleito, foi definido seguindo o modelo de Mohr-Coulomb drenado. Já os parâmetros da camada de geossintético foram definidos como material de comportamento elástico linear. O fluxo de água foi desconsiderado, visto que a estrutura do pavimento está acima do nível d'água.

Os materiais foram especificados buscando apresentar comportamento mais próximo dos materiais utilizados em campo. Contudo, num caso real, estes parâmetros devem ser definidos por meio de ensaios.

AASHTO (1993) sugere uma carga padrão conhecida como “carga de eixo único equivalente”, respectiva a uma carga de roda de eixo simples de 80 kN. Para simular o efeito

de carga cíclica, optou-se por aplicar um deslocamento prescrito de 25 mm sobre a faixa de 152 mm que compreende a área de aplicação da carga dos veículos, ou seja, a superfície de contato entre o pneu e o pavimento.

Após as definições dos materiais e características geométricas, as condições de contorno são definidas e adequadas conforme requisitos solicitados pelo próprio *software* para atender à configuração de malha mediana.

A Figura 6.18 abaixo mostram as características geométricas referente a todas as simulações com e sem a aplicação de geossintético.

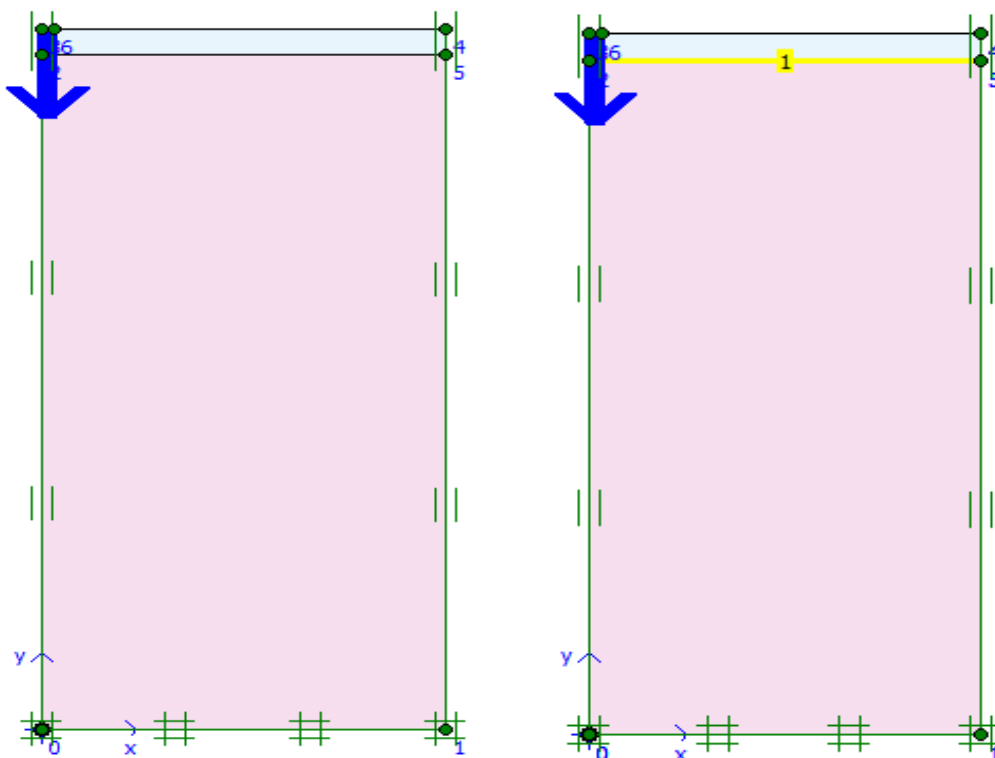


Figura 6.18: Condições de contorno para a análise do pavimento: a) Sem camada de geossintético entre a base e o subleito; b) Com camada de geossintético entre a base e o subleito

Assim, a partir de tais configurações e condições de contorno, obtém-se uma malha definida automaticamente pelo software, como mostra a Figura 6.19.

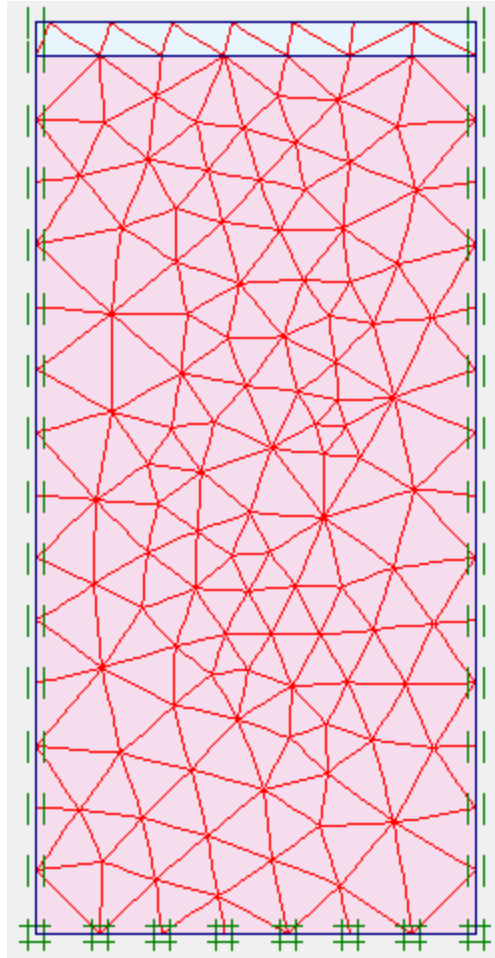


Figura 6.19: Malha média gerada pelo software.

A partir das condições iniciais e determinação de cálculo do tipo plástico de fase única para carregamento do tipo “construção em etapas”, foram geradas as conectividades da estrutura como mostrado na Figura 6.20.

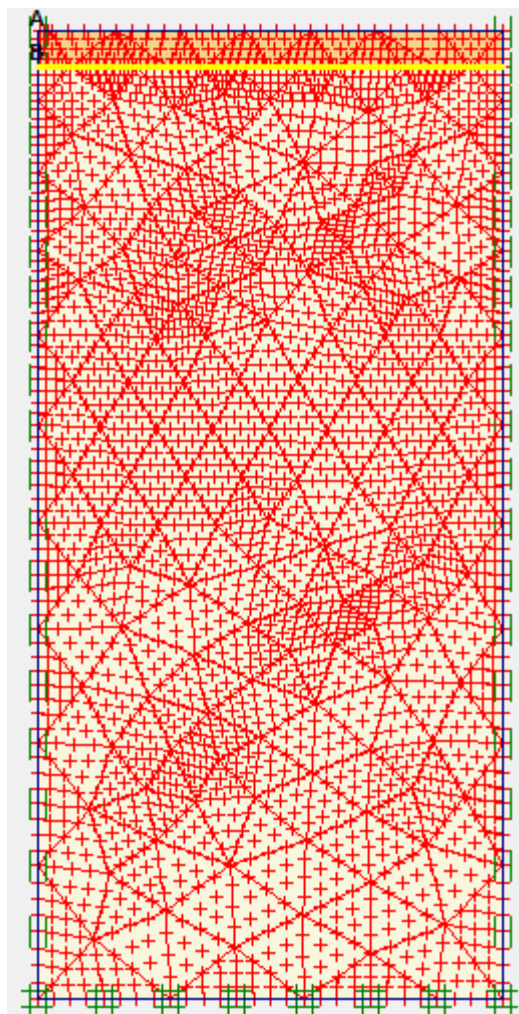


Figura 6.20 Conectividades da malha para simulação numérica

7 RESULTADOS E ANÁLISE

Definidas as condições iniciais, obtém-se os deslocamentos e tensões efetivas geradas na estrutura. Foram estabelecidas 250 etapas adicionais de iterações numéricas aos parâmetros de cálculo solicitados pelo *software*. Este valor é pré-definido pelo software e recomendado pelo tutorial do PLAXIS 2D V8 para simulações com malha mediana, como a utilizada.

As Figuras 7.21, 7.22 e 7.23 mostram os resultados obtidos para as simulações 1, 2 e 3, respectivamente, sem a inserção da camada de geossintético.

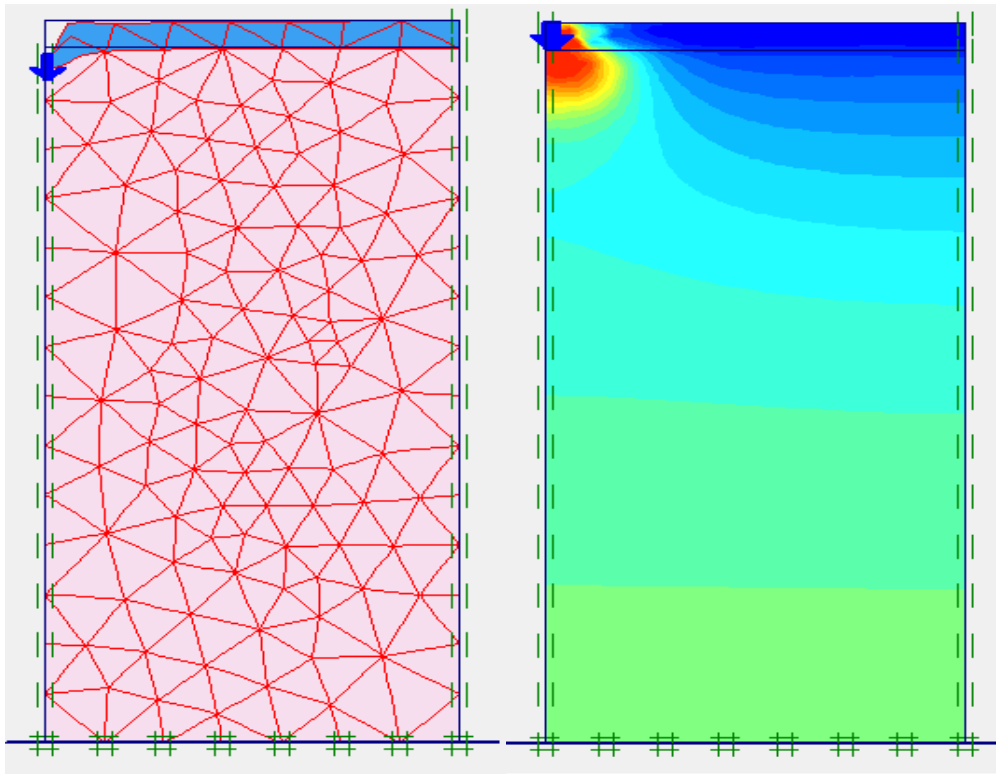


Figura 7.21: Simulação 1: a) Malha deformada; b) Distribuição de tensões de cisalhamento

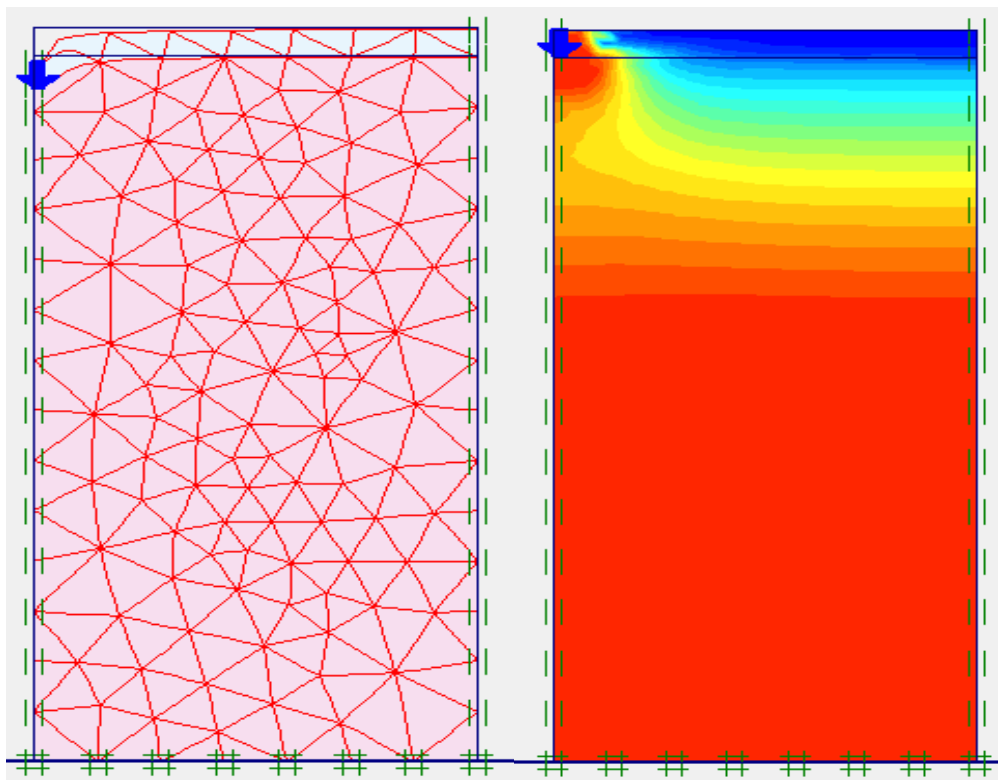


Figura 7.22: Simulação 2: a) Malha deformada; b) Distribuição de tensões de cisalhamento

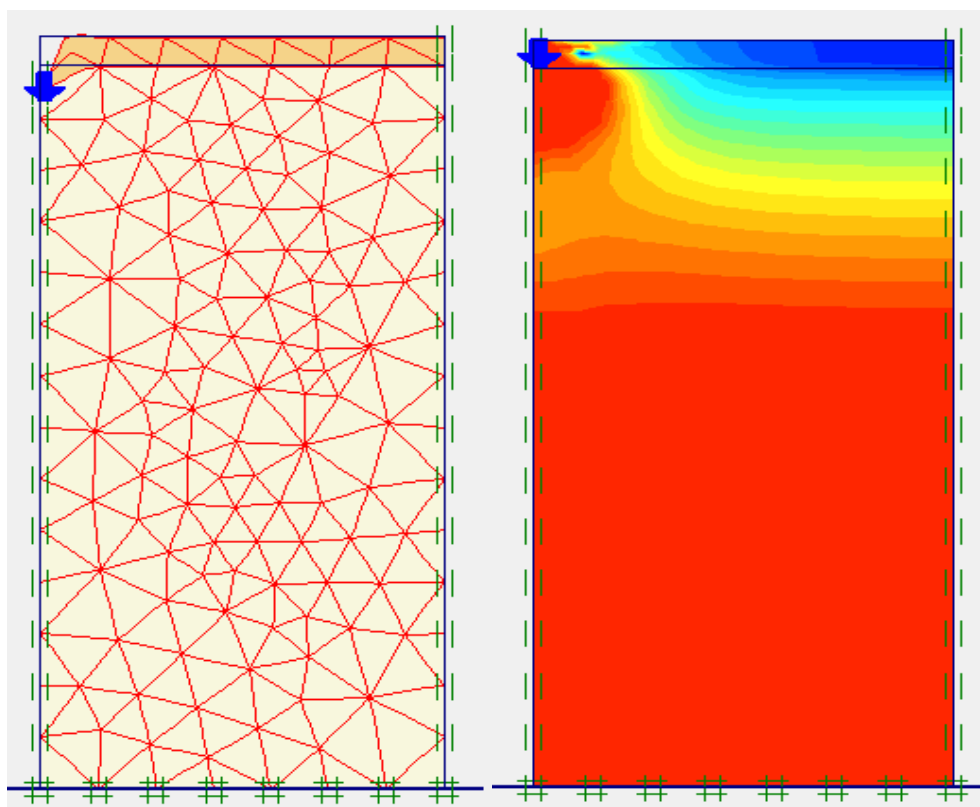


Figura 7.23: Simulação 3: a) Malha deformada; b) Distribuição de tensões de cisalhamento

Observa-se nas Figuras 7.21 (a) a 7.23 (a) que a malha deformada na região da aplicação do deslocamento prescrito representa uma concavidade característica das deformações de afundamento por consolidação nas trilha de roda.

A partir da análise das Figuras 7.21 (b) a 7.23 (b), percebe-se que a concentração de tensões na região do deslocamento prescrito possui uma área de influência significativa na estrutura do pavimento. Ainda, a transferência de tensões em uma área concentrada da camada de base para uma região mais ampla na camada do subleito fica evidenciada.

Desta forma, a inserção de uma camada de geossintético entre as duas camadas subsequentes de solo possibilitaria a transição das tensões de cisalhamento aplicadas sobre o maciço de solo para tensões de tração no material geossintético. Consequentemente, a camada de geossintético passaria a limitar a propagação de tensões para a camada inferior.

Comparando a resposta da estrutura sem geossintético com o uso de três geossintéticos com módulo de elasticidade distintos, obtêm-se os diagramas das Figuras 7.24 a 7.26 abaixo.

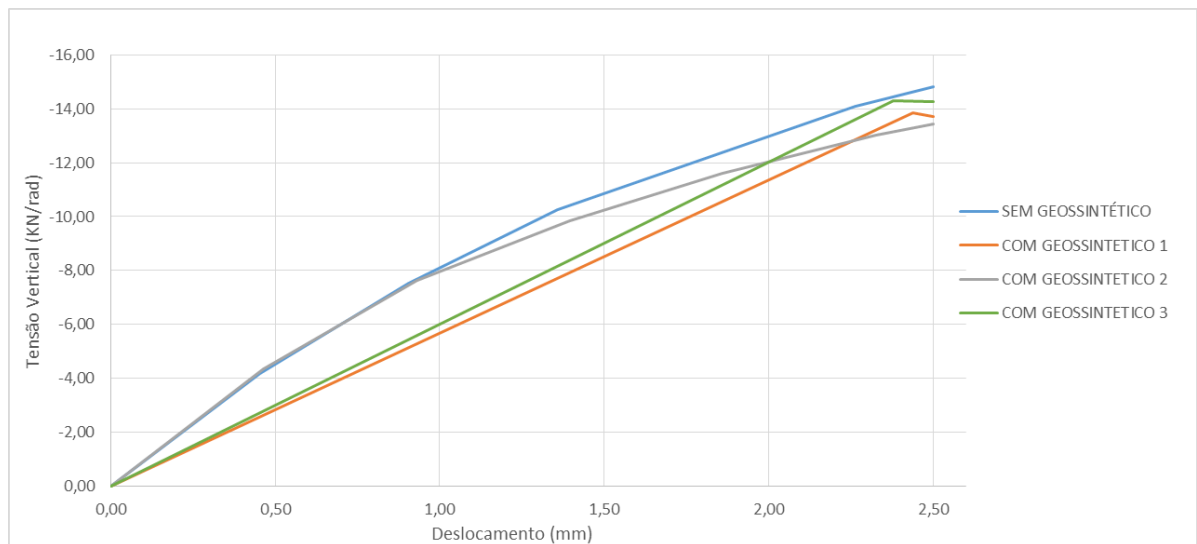


Figura 7.24: Relação entre o deslocamento prescrito e a tensão vertical no pavimento para a Simulação 1

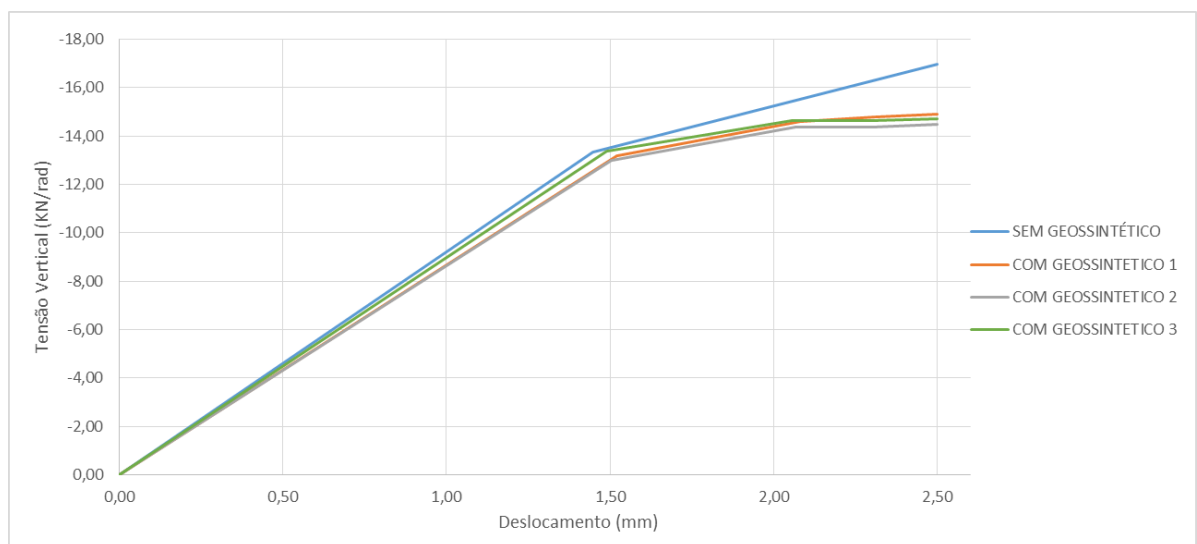


Figura 7.25: Relação entre o deslocamento prescrito e a tensão vertical no pavimento para a Simulação 2

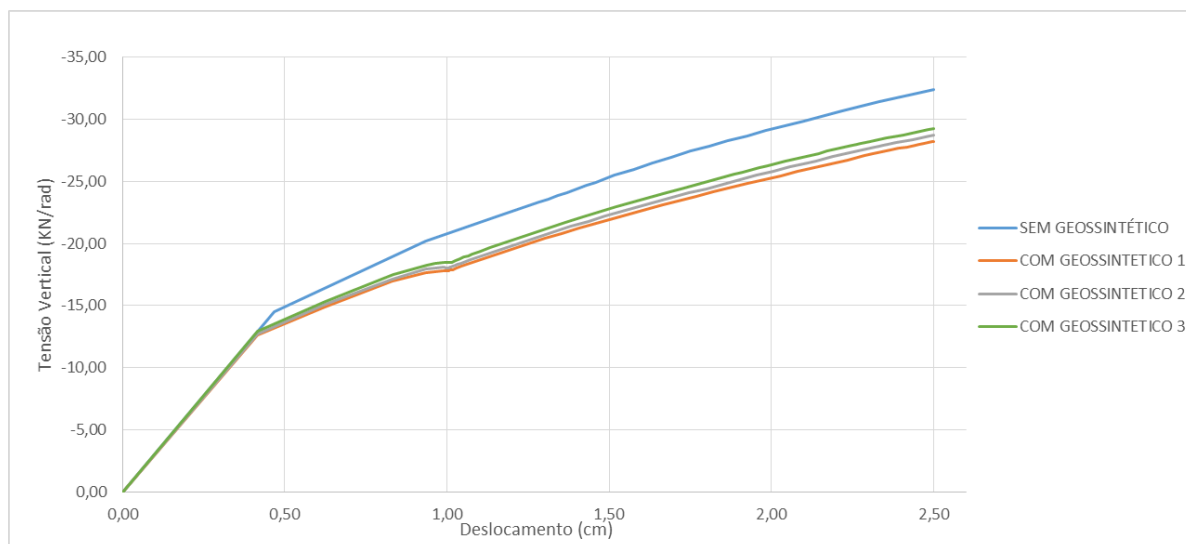


Figura 7.26: Relação entre o deslocamento prescrito e a tensão vertical no pavimento para a Simulação 3

A partir das figuras 7.24 a 7.26 acima, torna-se notável que a tensão vertical ao longo do deslocamento prescrito na estrutura sem o uso de geossintético apresenta valores significativamente maiores do que as tensões existentes com o uso de geossintéticos.

As simulações 1, 2 e 3 apresentaram redução média de tensões verticais de, respectivamente, 6,85%, 13,40% e 11,31%. A provável razão para a segunda simulação apresentar melhores resultados de redução de tensões com relação às seções com e sem geossintético deve-se ao fato da camada de base apresentar módulo de elasticidade mais elevado com relação à primeira simulação.

Na primeira simulação, a relação entre os módulos de elasticidade das camadas subsequentes eram de 2,5. Já nas simulações 2 e 3, esta relação é de 5 e 2 unidades. Assim, torna-se coerente a expressiva diferença entre a redução de tensões da primeira e segunda simulações.

As Figuras 7.27, 7.28 e 7.29 mostram os deslocamentos verticais a partir do eixo de simetria para as três simulações sem reforço e com os três tipos de geossintéticos aplicados, tomando como deslocamento zero a linha onde o geossintético é aplicado inicialmente, ou seja, a demarcação entre a camada de base e subleito.

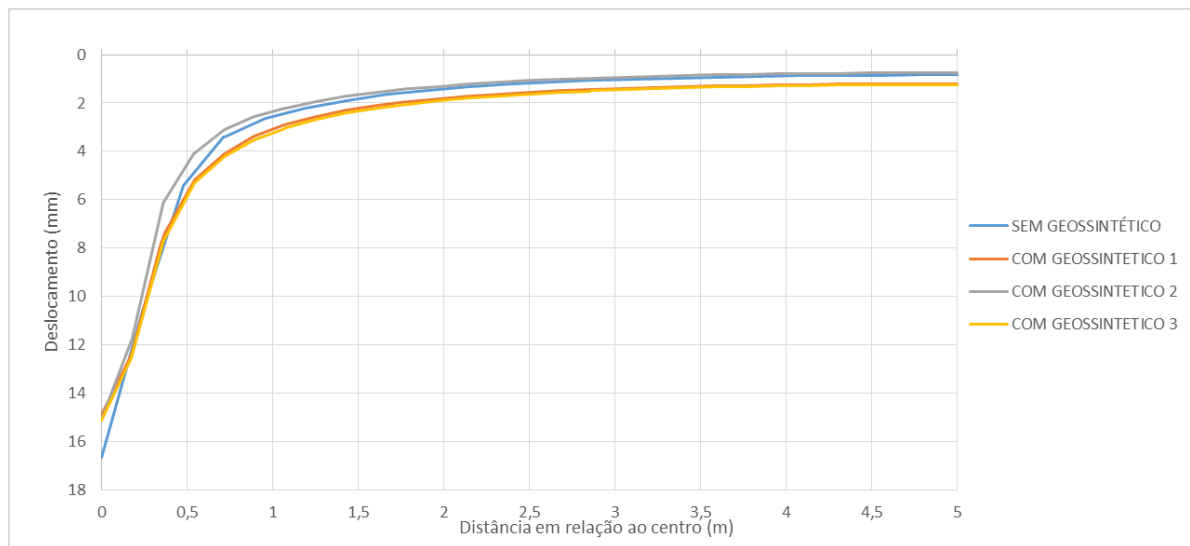


Figura 7.27: Deslocamentos verticais na Simulação 1

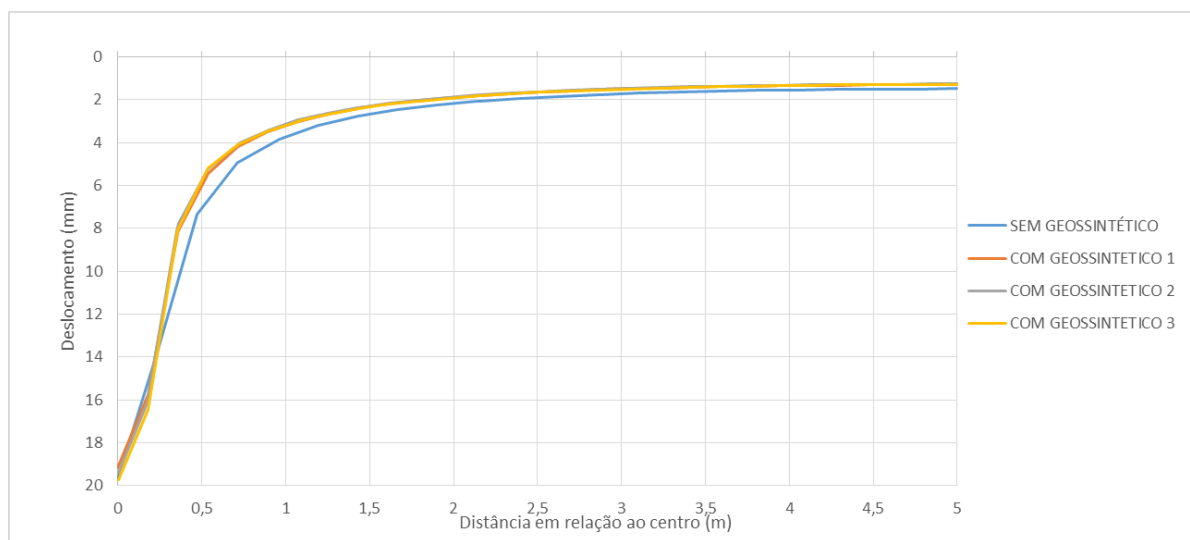


Figura 7.28: Deslocamentos verticais na Simulação 2

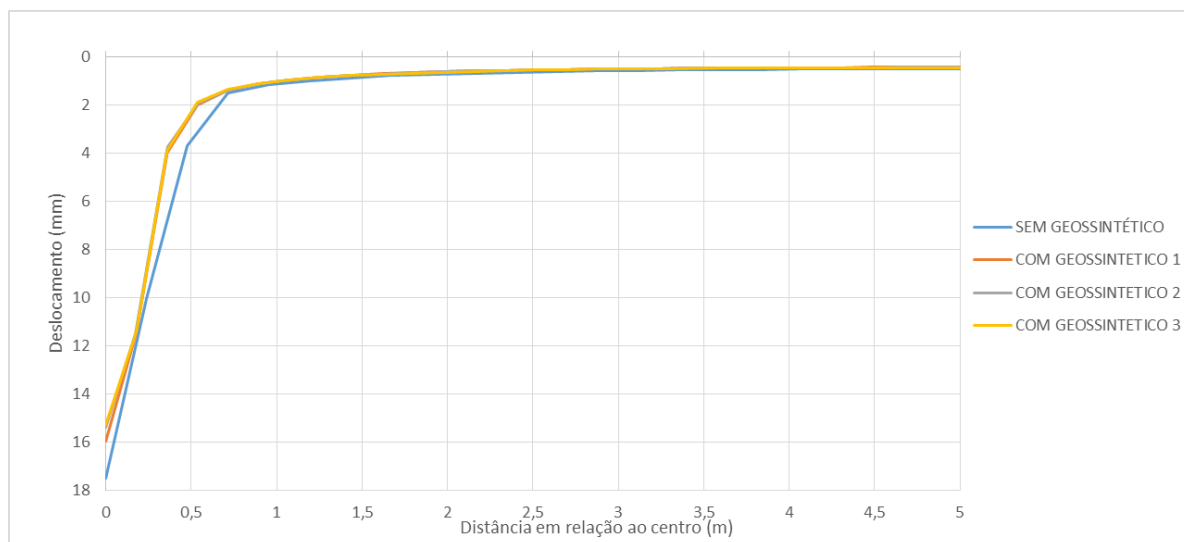


Figura 7.29: Deslocamentos verticais na Simulação 3

Nota-se através dos resultados obtidos demonstrados nas Figuras 7.27 a 7.29 que, para a primeira e terceira simulação, as reduções iniciais foram de aproximadamente 1,75 mm e 2 mm, respectivamente, para os três tipos de geossintético. Já para a segunda simulação, essa redução foi de aproximadamente 0,5 mm.

Observa-se também que o reforço com geossintético faz com que a concentração dos deslocamentos esteja mais próxima ao eixo de simetria, propagando em menor intensidade os deslocamentos verticais da mesma forma que ocorre no pavimento sem geossintético.

A partir das Figuras 7.30 a 7.32 abaixo mostram a relação de deslocamento sofrida diretamente no material geossintético.

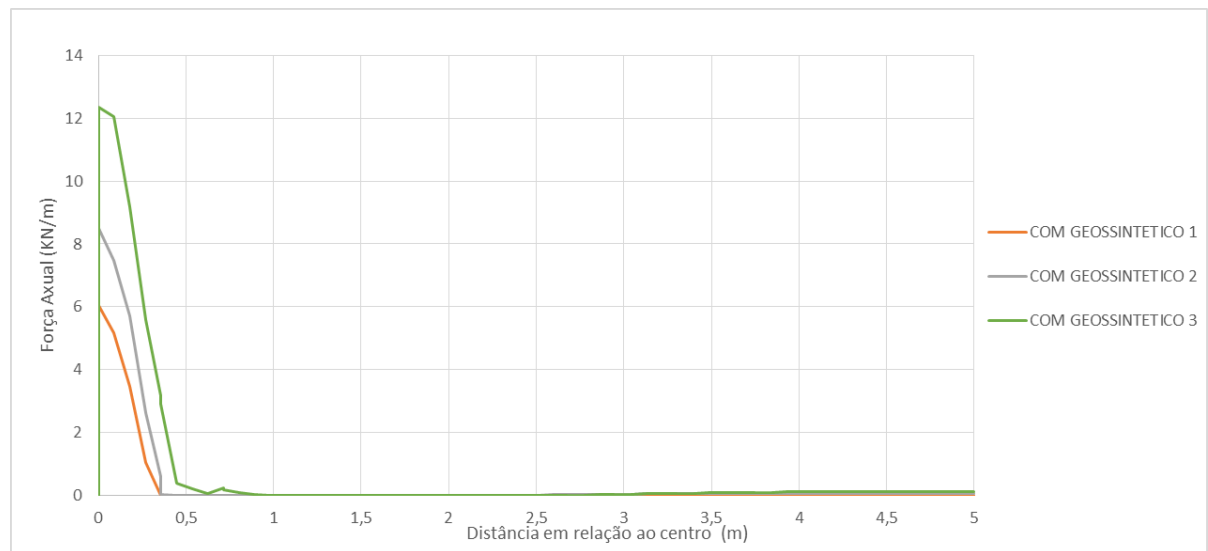
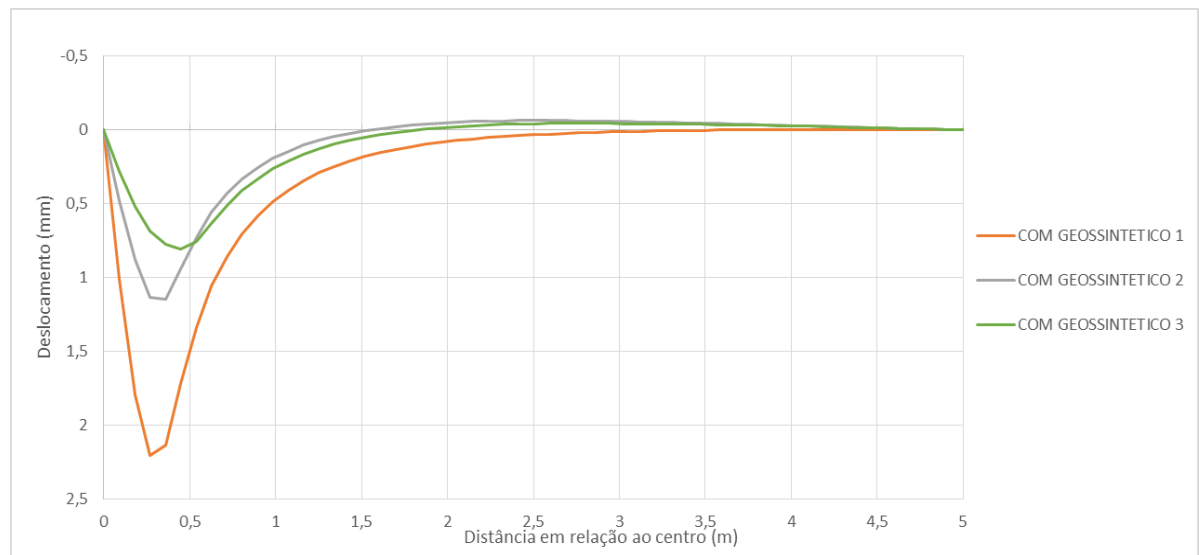


Figura 7.30: a) Deslocamento vertical; b) Força axial na camada de geossintético para a Simulação 1

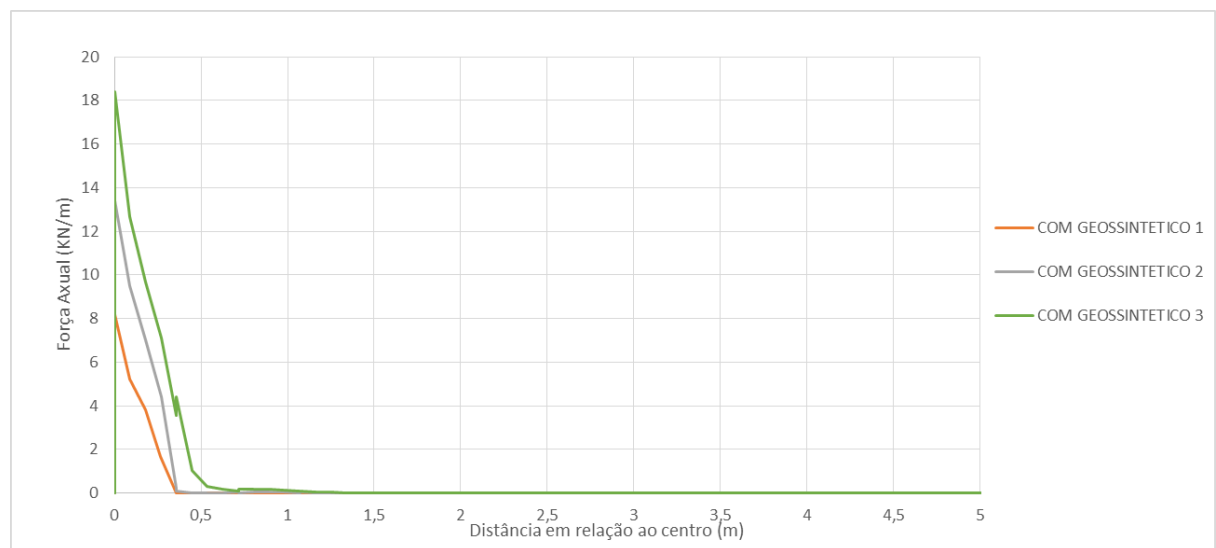
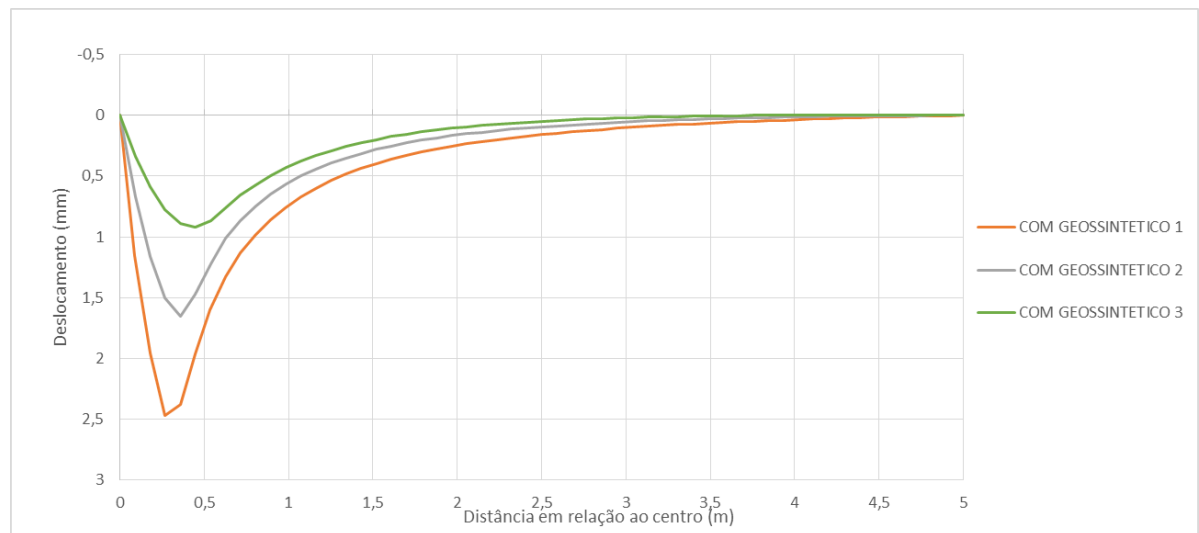


Figura 7.31: a) Deslocamento vertical; b) Força axial na camada de geossintético para a Simulação 2

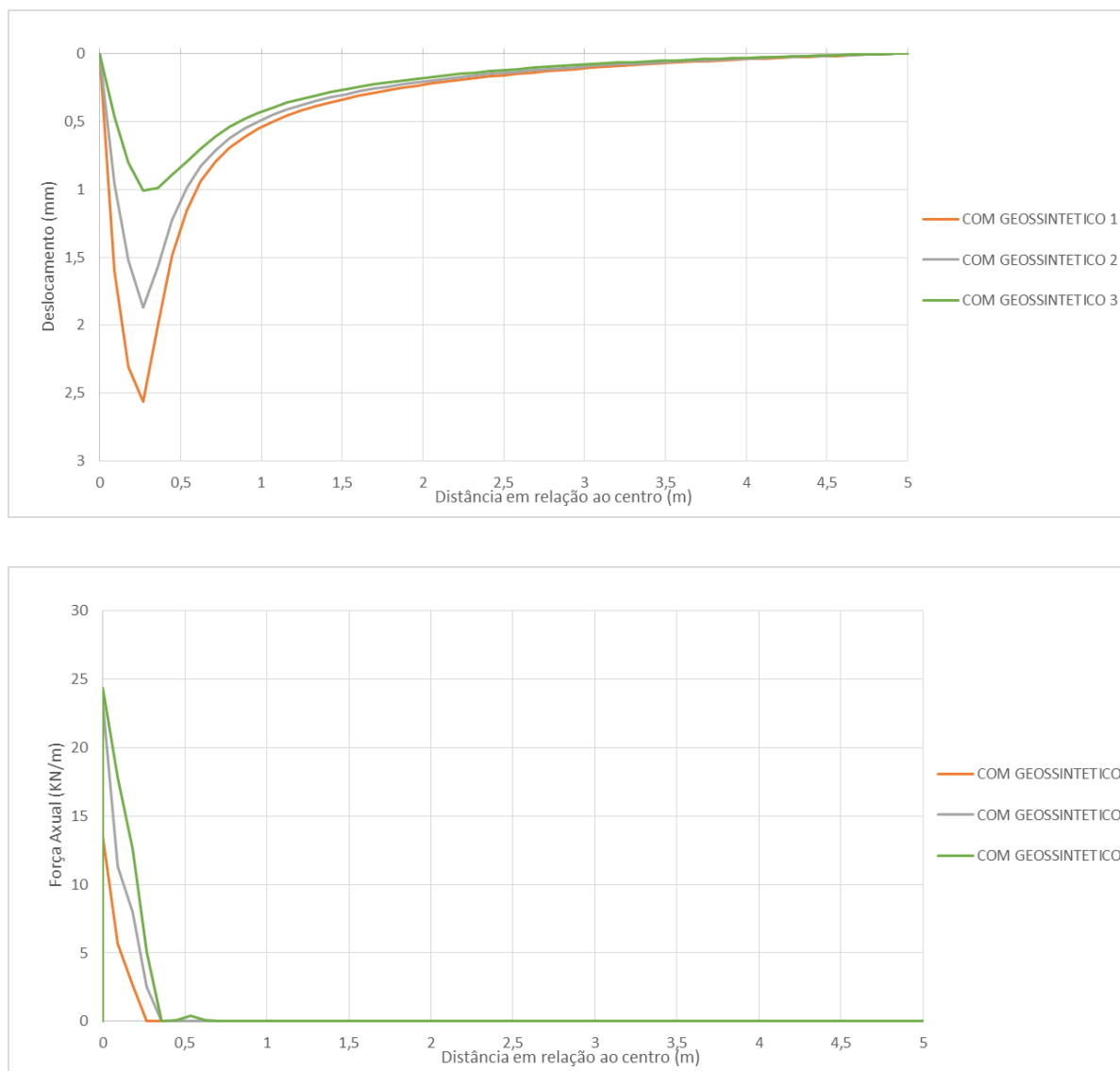


Figura 7.32: a) Deslocamento vertical; b) Força axial na camada de geossintético para a Simulação 3

A partir das Figuras 7.30 a 7.32, pode-se observar que o geossintético não apenas reduziu o desenvolvimento de tensões de cisalhamento na parte superior da camada de base, mas também proporcionou uma melhor distribuição das tensões efetivas.

A inclusão de camadas de reforço faz com que a carga aplicada sobre a camada de base se espalhe sobre uma área mais ampla do solo do subleito, reduzindo, consequentemente, os deslocamentos verticais oriundos do processo de consolidação a ser desenvolvido.

Ainda, o geossintético com maior rigidez à tração proporcionou uma melhor distribuição das deformações verticais, além de absorver uma parcela maior das forças axiais resultantes. Portanto, infere-se que quanto mais camadas de reforço forem incluídas no solo da estrutura do pavimento, mais notável será o efeito redutor de tensões no solo da fundação.

Por outro lado, não é possível inferir que o posicionamento do geossintético entre a camada de base e subleito encontra-se na posição mais favorável. Portanto, seriam necessárias simulações equivalentes às realizadas, alterando-se apenas o posicionamento do geossintético com relação à superfície para a avaliação dos resultados.

8 CONCLUSÃO

Neste Projeto Final, pretendeu-se avaliar o uso de reforço geossintético em pavimentos flexíveis. Para isso, o estudo foi feito a partir da aplicação de um deslocamento prescrito para avaliar as relações de tensão e deformação sofridas pela estrutura do pavimento. Compreendeu-se que a resistência do solo, juntamente com a rigidez à tração do material geossintético aplicado influenciam diretamente nas tensões de cisalhamento sofridas pelo maciço de solo.

Além disso, ficou entendido que parâmetros como o ângulo de atrito entre as partículas do solo, a coesão e o ângulo de dilatância do material que compõe as camadas de base e subleito têm grande influência na maior ou menor estabilidade da estrutura.

Com o conhecimento destes fatores e a utilização de *software* de elementos finitos PLAXIS 2D V8, foi possível elaborar uma análise numérica mais aproximada para a seção da rodovia em estudo. Aqui, todos os parâmetros relativos ao solo e ao geossintético foram estimados, mas recomenda-se que, em uma situação real, tais parâmetros sejam definidos através de ensaios em laboratório para expressar com maior precisão as condições reais dos compostos do pavimento.

Após comparar as análises feitas considerando o a construção do pavimento com e sem uma camada de reforço com geossintético, conclui-se que as tensões e deformações transferidas da camada de base para a camada de subleito são significativamente menores com o uso de geossintético. Os esforços sofridos pela camada subsequente apresentam-se reduzidos e, conseqüentemente, justificam o uso do geossintético entre as camadas.

Por fim, nota-se que camadas mais finas poderiam ser aplicadas se for considerada apenas a solicitação exigida do maciço com e sem geossintético, porém respeitando as espessuras de camada mínimas estabelecidos por norma. Ainda, pode tornar-se viável a aplicação de material menos nobre e menos oneroso, muitas vezes disponível no local da construção, contudo mantendo-se as características de desempenho e qualidade do pavimento como um todo.

Evidentemente, vale ressaltar que apesar das alternativas propostas visando melhorar o desempenho das estruturas do pavimento, bons projetos devem ser seguidos por uma boa execução e manutenção para que sejam atendidas as condições técnicas, econômicas e de segurança essenciais em obras de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington. 1993.

ACQUA. ACQUA. ACQUA. Disponível em: <<http://www.acquaverde.com.br/index.php>>. Acesso em: 15 Junho 2016.

AL-QADI, I. L. et al. Laboratory Evaluation of Geosynthetic Reinforced Pavement Sections, 1994. p. 25-31.

ABNT NBR 13292:1995. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 1995.

ABNT NBR 14545:2000. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 2000.

ABNT NBR ISO 10318:2013. Geosynthetics - Part 1: Terms and definitions. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 2013.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos: Publicação IPR - 719. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, p. 274. 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2º Relatório de Revisão de Projeto em Fase de Obras. Supervisão, Acompanhamento e Controle de Execução das Obras de Melhoramentos, Adequação de Capacidade, Duplicação, Obras de Arte Especiais e

Complementares, da Rodovia BR-020/DF. Segmentos: Km 0,00 ao Km 9,00 e km 23,60 ao Km 58,70. p. 204. 2008.

COLLIN, J. G.; KINNEY, T. C.; FU, X. Full Scale Highway Load Test of Flexible Pavement Systems With Geogrid Reinforced Base Courses. *Geosynthetics International*, Vol. 3, No 4, 1996.

CTG ABINT. Comitê Técnico de Geossintéticos. CTG ABINT. Disponível em: <<http://www.geossinteticos.org.br/index.html>>. Acesso em: 15 Junho 2016.

DAS, B. M. Fundamentos da Engenharia Geotécnica. 6º edição. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

HUA, J. Finite element modeling analysis of accelerated pavement testing devices and rutting phenomenon. Purdue University. West Lafayette. 2000.

IGS. Associação Brasileira de Geossintéticos. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/>>. Acesso em: 07 Maio 2016.

MONTESTRUQUE, G. E. V. Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistema anti-reflexão de trincas, 2002.

PASQUINI, E.; BOCCI, M.; CANESTRARI, F. Laboratory characterisation of optimised geocomposites for asphalt pavement reinforcement. *Geosynthetics International*, 2014. 24-36.

PERKINS, S. W.; ISMEIK, M. A synthesis and evaluation of geosynthetic-reinforced base layer in flexible pavements: Part I. *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 6, 1997. p. 549-604.

PETROBRÁS. Província Petrolífera de Urucu. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/urucu/urucu.html>>. Acesso em: 15 Junho 2016.